

---

Facharbeit aus dem Leistungskurs Physik

## Frequenzfilter für Lautsprecher



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Problemstellung .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Frequenzfilter und Weichen.....</b>	<b>8</b>
4.1	Terminologische Grundlage .....	8
4.2	Verwendung in Lautsprechern .....	8
<b>5</b>	<b>Ausführungsvarianten von Frequenzfiltern .....</b>	<b>9</b>
5.1	Analoge Bauvariante .....	9
5.1.1	Passiv .....	9
5.1.2	Aktiv .....	9
5.2	Digital-Aktive Bauvariante.....	10
<b>6</b>	<b>Analoge passive Filter .....</b>	<b>12</b>
6.1	Allgemeines.....	12
6.1.1	Funktionsweise .....	13
6.1.1.1	<i>Tiefpass-Filter .....</i>	<i>13</i>
6.1.1.2	<i>Hochpass-Filter.....</i>	<i>14</i>
6.1.1.3	<i>Bandpass-Filter.....</i>	<i>15</i>
6.1.1.4	<i>Subsonic-Filter .....</i>	<i>16</i>
6.1.2	Bauteile .....	16
6.1.2.1	<i>Der Kondensator.....</i>	<i>17</i>
6.1.2.2	<i>Die Spule .....</i>	<i>18</i>
6.1.2.3	<i>Der Widerstand.....</i>	<i>19</i>
6.1.3	Auswahl der Bauteile .....	20

---

<b>6.2</b>	<b>Praktischer Bau und Berechnung von analogen passiven Filtern .....</b>	<b>20</b>
6.2.1	Berechnung von Frequenzfiltern .....	23
6.2.2	Bau eines Tiefpass-Filters.....	25
6.2.3	Bau einer 2-Wege Frequenzweiche .....	26
<b>6.3</b>	<b>Messungen der Frequenzgänge .....</b>	<b>27</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>33</b>

---

# 1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aktive Filterschaltung .....	10
Abb. 2: Flankensteilheiten von Frequenzfiltern 1. - 4. Ordnung.....	12
Abb. 3: Grenzfrequenzen $f_1$ und $f_2$ einer Dreiwege-Weiche .....	13
Abb. 4: Tiefpass-Filter 1. - 3. Ordnung .....	14
Abb. 5: Hochpass-Filter 1. - 3. Ordnung .....	15
Abb. 6 Bandpass-Filter 1. - 3. Ordnung .....	16
Abb. 7: Frequenzabhängigkeit des Widerstandes .....	18
Abb. 8: Spannungsteiler im Mitteltonzweig mit den Widerständen $R_1$ und $R_2$ .....	20
Abb. 9: Schaltplan des 12V Verstärkers .....	21
Abb. 10: 12V Verstärker und 2-Wege-Lautsprecher.....	21
Abb. 11: Vergleich der Frequenzgänge verschiedener Filter .....	22
Abb. 12: Serielle und parallele Frequenzweiche im Vergleich.....	23
Abb. 13: Tiefpassfilter 1. Ordnung.....	26
Abb. 14: Schaltplan der konstruierten 2-Wege Frequenzweiche 2. Ordnung .....	27
Abb. 15: Frequenzmessung eines 1kHz Tones.....	28
Abb. 16: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ an der 2-Wege Frequenzweiche .....	29
Abb. 17: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ an der 2-Wege Frequenzweiche ohne Einsatz des Hochtöners .....	30
Abb. 18: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ mit (blaue Linie) und ohne (gelbe Linie) Tiefpassfilter .....	31

---

## 2 Formelverzeichnis

C	Kapazität eines Kondensators in [ $\mu\text{F}$ ]
$f_c$	Grenzfrequenz eines Frequenzfilters in [Hz]
L	Induktivität einer Spule in [mH]
$X_c$	Frequenzabhängiger Widerstand eines Kondensators in [ $\Omega$ ]
$X_L$	Frequenzabhängiger Widerstand einer Spule in [ $\Omega$ ]
Z	Impedanz eines Lautsprecher-Chassis in [Ohm]
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit in [ $\frac{1}{\text{s}}$ ]

### 3 Problemstellung

Gute Lautsprecher sind heutzutage aus keinem Haushalt mehr wegzudenken. Wo früher ein Grammophon stand, steht heute eine moderne Hifi-Anlage. Surround-Sound-Systeme findet man mittlerweile nicht nur im Kino, sondern auch in vielen Wohnzimmern. Ebenso sind gute Lautsprecher bei Veranstaltungen, Konzerten oder in Diskotheken von Nöten.

Problematisch hierbei gestaltet sich die Tatsache, dass ein einzelnes Lautsprecher-Chassis, welches die jeweiligen Töne wiedergibt, nicht dazu fähig ist, alle Töne optimal abzuspielen. Ein Tieftöner ist nicht in der Lage hohe Töne vorbildlich wiederzugeben. Genauso kann ein Hochtöner keine tiefen Töne ausstrahlen. Dies ist schon aufgrund der Größe der einzelnen Chassis ersichtlich. Um einen 500Hz-Ton optimal wiederzugeben, müsste der Membrandurchmesser der ganzen bzw. der halben Wellenlänge des jeweiligen Tones entsprechen. Dies entspräche bei der halben Wellenlänge einem Durchmesser von 34,3 cm, welcher nicht annähernd der Größe eines Hochtöners gleichkommen würde (ca. 5 cm). Somit ist es für diesen nicht möglich, einen 500Hz-Ton erfolgreich auszustrahlen.

Um die Diskrepanz zwischen dieser Tatsache und den modernen, zeitentsprechenden Anforderungen und Nachfragen von Markt und Gesellschaft umgehen bzw. minimieren zu können, besteht die Notwendigkeit, eine moderne Lautsprecherbox mit mindestens 2 Chassis auszustatten: Mit einem Tieftöner, der für die Grundtöne bis ca. 2kHz verantwortlich ist, sowie mit einem für die Obertöne über 2kHz zuständigen Hochtöner. Diese Kombination nennt sich Zwei-Wege-Lautsprecher.<sup>1</sup>

„Dreiweg-Boxen trumpfen noch mit einem zusätzlichen Mitteltöner auf [...]“.<sup>2</sup> Dieser erfüllt im Rahmen des akustischen Spektrums die Aufgaben für die mittleren Frequenzen. Ein großer Teil der menschlichen Sprache liegt genau in diesem Bereich. Die Einsatzbereiche der Tief- und Hochtöner verlagern sich bei einer Drei-Wege-Box somit in geringem Umfang nach unten bzw. nach oben.

Hierbei liegt die spezifische Aufgabe der Frequenzweiche darin, das Tonsignal, welches das komplette Frequenzband enthält, in die entsprechenden Frequenzbereiche

---

<sup>1</sup> Vgl. S. 155 (Stark 2004)

<sup>2</sup> S. 155 (Stark 2004)

der einzelnen Chassis zu spalten. Auf diese Weise soll erreicht werden, dass jedem Chassis nur die Töne zugeführt werden, die es am besten wiedergeben kann.<sup>3</sup>

Im Folgenden soll in dieser Arbeit genau hierauf Bezug genommen und speziell der Aufbau und die Funktion derartiger Filter näher betrachtet und diskutiert werden.

---

<sup>3</sup> Vgl. S. 155 (Stark 2004)

## **4 Frequenzfilter und -weichen**

### **4.1 Terminologische Grundlage**

Eine Frequenzweiche hat die Aufgabe ein elektrisches Signal, welches mehrere Frequenzen enthält, auf zwei oder mehrere Ausgänge aufzuteilen. An diesen treten jeweils unterschiedliche Teile des ehemaligen gesamten Frequenzspektrums aus.<sup>4</sup>

### **4.2 Verwendung in Lautsprechern**

Frequenzfilter bzw. Frequenzweichen werden in der heutigen Technik sehr vielfältig eingesetzt. Ihre Dienste werden beispielsweise beim analogen Antennenfernsehen oder auch für gute Lautsprecher benötigt. Dieser Einsatz in Lautsprechern soll in Folgendem in dieser Arbeit diskutiert werden.

---

<sup>4</sup> Vgl. (Frequenzweiche - Wikipedia 2009)



---

## 5 Ausführungsvarianten von Frequenzfiltern

### 5.1 Analoge Bauvariante

Analoge Frequenzfilter sind die ältesten Frequenzfilter und können zwischen passiven und aktiven Filtern unterschieden werden.

#### 5.1.1 Passiv

Passive Filter sind zusammen mit den Anfängen der Mehrwege-Lautsprecher in den 30er Jahren entstanden. In dieser Arbeit werden nur passive Filter näher betrachtet, da aktive bzw. digitale Filter eine zu große Komplexität aufweisen und deshalb nur sehr oberflächlich behandelt werden. Passive Frequenzfilter bestehen unzweifelhaft aus nur passiven Bauelementen, welche in diesem Fall Spulen, Kondensatoren und Widerstände sind (vgl. 6.1.2). Passive Frequenzfilter besitzen den Vorteil, dass für mehrere Chassis nur ein Leistungsverstärker von Nöten ist. Diese Frequenzfilter werden zwischen Leistungsverstärker und Lautsprecherbox geschaltet, da die verlustbehafteten Bauteile das sonst noch nicht verstärkte Tonsignal, welches im mV-Bereich vorliegt, zu stark reduzieren bzw. verfälschen würden. Aufgrund der für den Betrieb von Lautsprechern notwendigen hohen Leistung, welche vom Leistungsverstärker erzeugt wird, müssen die Bauteile der Frequenzweiche, die einen Teil der Leistung in Wärme umwandeln, dementsprechend groß dimensioniert werden. Dieser Nachteil führt zu höheren Kosten der Bauteile. Trotzdem ist der passive Frequenzfilter der meistverwendete Filter, vor allem im Home-Hifi Bereich, da er insgesamt kostengünstiger und einfacher herzustellen ist als andere Filter.<sup>5</sup>

#### 5.1.2 Aktiv

Das Gegenstück zu den passiven Filtern bilden die aktiven Filter, die aus den gleichen passiven Bauteilen bestehen, aber zusätzlich aktive Bauelemente wie Operationsverstärker enthalten. Im Gegensatz zu passiven Filtern werden aktive Filter, da sie eingebaute Vorverstärker besitzen, vor den Leistungsverstärkern eingesetzt. Hierdurch kann die Signalabschwächung der verlustbehafteten passiven Bauteile ausgeglichen werden. Da aktive Frequenzfilter die Frequenzen vor den Leistungs-

---

<sup>5</sup> Vgl. Abschnitt: Passivweichen (Frequenzweiche - Wikipedia 2009)

verstärkern trennen, ist für jeden Weg ein separater Verstärker nötig.<sup>6</sup> Folgende Grafik zeigt den Aufbau eines solchen Filtersystems:<sup>7</sup>

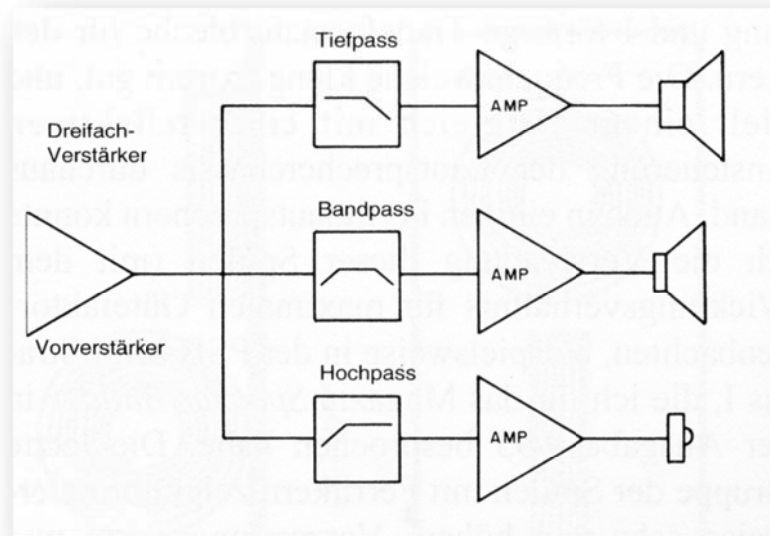


Abb. 1: Aktive Filterschaltung

Aktive Frequenzfilter werden in professionellen Beschallungssystemen, die zum Beispiel für Live-Auftritte von Bands notwendig sind, eingesetzt. Aufgrund ihrer Komplexität und Kostenintensität haben aktive Filter keine Verwendung im häuslichen Gebrauch gefunden. Aktive Filter besitzen einige Vorteile, welche die Klangwiedergabe verbessern. Ein Vorteil dabei ist ein größerer Dynamikbereich, welcher durch die Ansteuerung der Chassis durch separate Leistungsverstärker entsteht. Des Weiteren sind Chassis mit unterschiedlichen Empfindlichkeiten leichter zu kontrollieren, da der Pegel jedes einzelnen Chassis ebenfalls einzeln kontrolliert werden kann. Weitere Vorteile Aktiver Filter sollen hier nicht weiter diskutiert werden, da der Umfang sonst ein nicht vertretbares großes Ausmaß annehmen würde.<sup>8</sup>

## 5.2 Digital-Aktive Bauvariante

Die Weiterentwicklung von analogen aktiven Frequenzfiltern stellen digitale aktive Frequenzfilter dar, deren Aufbau in den Grundzügen dem des analog aktiven Frequenzfilters ähnelt. Beim digitalen Frequenzfilter wird mittels eines Analog-Digital-Wandlers das vorhandene Tonsignal einem „Digitalen Signalprozessor“ (kurz: DSP)

<sup>6</sup> Vgl. S. 245 f. (Dickason 2005)

<sup>7</sup> Quelle: S. 245 (Dickason 2005)

<sup>8</sup> Vgl. S. 246 (Dickason 2005)

zugeführt, der das nun mathematisch vorliegende Signal trennt. Weiterhin können zum Beispiel Laufzeitunterschiede, die bei unterschiedlichem Abstand der einzelnen Chassis gegenüber der Hörposition auftreten können, korrigiert werden. Anschließend wird mittels eines Digital-Analog-Wandlers das digitale Signal in mehrere getrennte, analoge Signale umgewandelt, die nun den Leistungsverstärkern und schließlich den einzelnen Chassis zugeführt werden.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. Abschnitt: Digitale Aktivweichen (Frequenzweiche - Wikipedia 2009)

## 6 Analoge passive Filter

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise von analogen Filtern.

### 6.1 Allgemeines

Um ein Hintergrundwissen zu erlangen, das nötig ist, um die Funktion analoger Filter zu verstehen, sollen in diesem Abschnitt die allgemeinen Spezifikationen dieser Filter diskutiert werden. Die Sperrwirkung, die für gewöhnlich in dB/Oktave angegeben wird, ist ein charakteristisches Zeichen für die Abschwächung des Signals, welches außerhalb des für das Tonsignal durchlässigen Bereiches liegt. Die resultierenden Sperrwirkungen sind 6, 12, 18 bzw. 24dB/Oktave, welche einem Filter der 1., 2., 3. bzw. 4. Ordnung entsprechen. Bei einem Filter 1. Ordnung wird das Signal pro Oktave um 6dB abgeschwächt, bei einem Filter 2. Ordnung um 12dB. Folglich trennt ein Filter 2. Ordnung das Signal „steiler“ als ein Filter 1. Ordnung, weshalb die Sperrwirkung auch Flankensteilheit genannt wird.<sup>10</sup> Folgende Abbildung verdeutlicht die unterschiedlichen Flankensteilheiten der Filter 1. bis 4. Ordnung:<sup>11</sup>

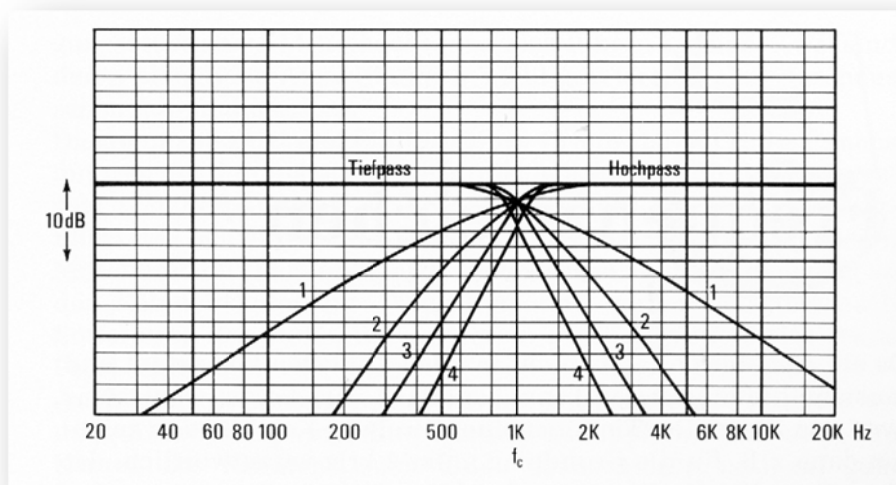


Abb. 2: Flankensteilheiten von Frequenzfiltern 1. - 4. Ordnung

Weiterhin ist die Grenzfrequenz eines Frequenzfilters zu erwähnen. Die Grenzfrequenz ist die Frequenz, bei der die elektrische Spannung am Ausgang des Filters um  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  des Spannungswertes am Eingang reduziert wurde. Dies entspricht einer Pegel-

<sup>10</sup> Vgl. S. 14 (Schwamkrug 1991)

<sup>11</sup> Quelle: S. 156 (Stark 2004)

absenkung um 3dB.<sup>12</sup> Folgende Abbildung zeigt die Grenzfrequenzen einer 3-Wege-Weiche:<sup>13</sup>

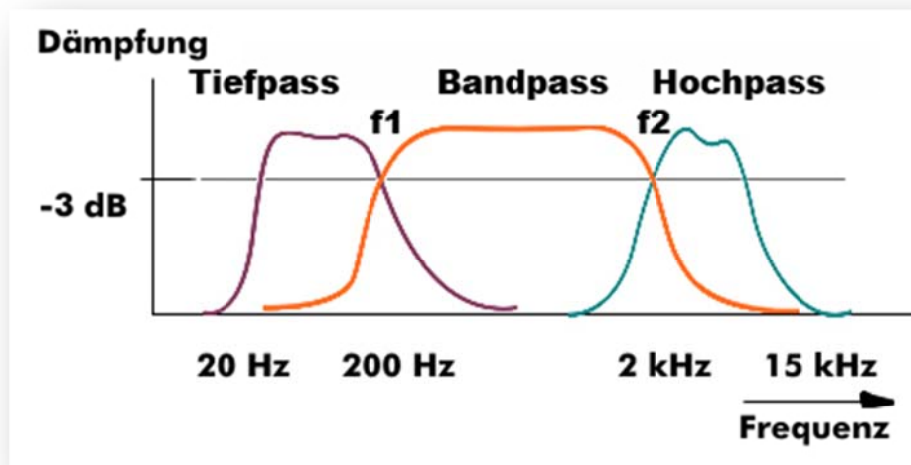


Abb. 3: Grenzfrequenzen f1 und f2 einer Dreiwege-Weiche

### 6.1.1 Funktionsweise

In diesem Abschnitt soll die Funktionsweise der verschiedenen Filter diskutiert werden.

#### 6.1.1.1 Tiefpass-Filter

Der Tiefpass ist ein Filter, der Frequenzen unterhalb einer bestimmten Trennfrequenz passieren lässt. Höhere Frequenzen werden dagegen abgeschwächt. Tiefpässe, auch genannt High-Cut Filter, werden in Verbindung mit Tieftönern eingesetzt, so dass es möglich ist, dem Tieftöner nur die tiefen Frequenzen, die er auch verarbeiten kann, zuzuführen. In der Lautsprechertechnik werden Tiefpässe der 1. bis 4. Ordnung eingesetzt. Ein Tiefpass 1. Ordnung besteht nur aus einer Spule, die vor den Lautsprecher geschaltet wird. Damit wird eine Flankensteilheit von 6dB/Oktave erreicht. Um eine Pegelabsenkung von 12dB/Oktave zu erhalten, wird zusätzlich zur Spule ein Kondensator parallel zum Lautsprecher geschaltet. Diese Kombination wird als Tiefpass 2. Ordnung bezeichnet. Ein Tiefpass 3. Ordnung trennt mit der Flankensteilheit 18dB/Oktave. Dieser Tiefpass entspricht einem Tiefpass 2. Ordnung, wobei zusätzlich eine weitere Spule in Reihe zum Lautsprecher

<sup>12</sup> Vgl. S. 14 (Schwamkrug 1991)

<sup>13</sup> In Anlehnung an: (Frequenzweiche ITWissen.info 2009)

geschaltet wird. Ein Tiefpassfilter 4. Ordnung ist auch gleichermaßen aufgebaut wie ein Tiefpass 2. Ordnung, nur dass dabei zwei dieser Filter hintereinandergeschaltet werden, was bei der Berechnung solcher Filter beachtet werden muss (siehe 6.2.1).<sup>14</sup> Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau von Tiefpassfiltern 1. bis 3. Ordnung:<sup>15</sup>

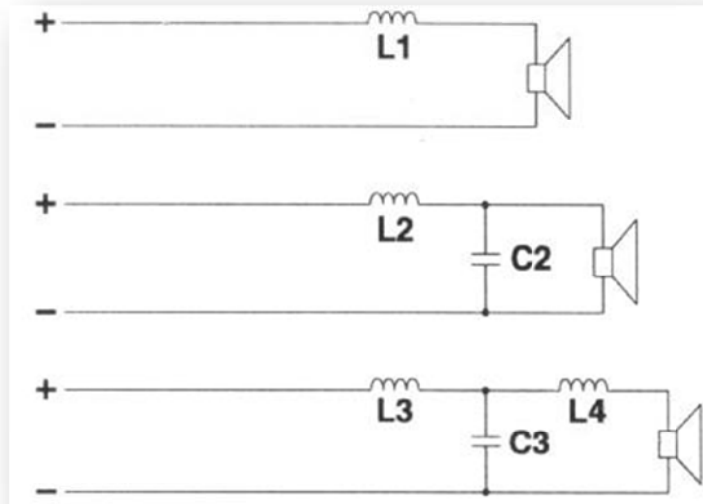


Abb. 4: Tiefpass-Filter 1. - 3. Ordnung

#### 6.1.1.2 Hochpass-Filter

Der Hochpass-Filter, auch Low-Cut Filter genannt, ist das Gegenstück zum Tiefpass-Filter. Der Hochpass-Filter schwächt Frequenzen unterhalb der Trennfrequenz ab, höhere dagegen nicht. Somit wird dieser Filter in Verbindung mit Hochtönern eingesetzt, um diesen nur mit den entsprechend hohen Tönen zu versorgen und ihn vor niedrigen Frequenzen, welche eine schädliche Wirkung zur Folge hätten, zu schützen. Bei Lautsprechern existieren ebenfalls Hochpassfilter der 1. bis 4. Ordnung. Der Aufbau des Hochpass-Filters ist prinzipiell genau spiegelbildlich zu dem des Tiefpass-Filters. Ein Hochpass-Filter 1. Ordnung mit der Dämpfung 6dB/Oktave besteht aus einem Kondensator, der in Reihe zum Lautsprecher geschaltet wird. Bei einem Filter 2. Ordnung ist demnach zusätzlich eine Spule, welche parallel zum Chassis geschaltet wird, vorhanden. Die Flankensteilheit dieser Ordnung beträgt 12dB/Oktave. Um 18dB/Oktave zu erreichen, wird ein Hochpass 3. Ordnung benötigt, bei dessen Schaltung ein weiterer Kondensator in Reihe zum Chassis hinzugefügt werden muss. Ein Hochpass 4. Ordnung mit der Dämpfung 24dB/Oktave besteht

<sup>14</sup> Vgl. (Tiefpass Filter 2009)

<sup>15</sup> Quelle: (Tiefpass Filter 2009)

ebenfalls aus zwei hintereinandergeschalteten Hochpässen 2. Ordnung.<sup>16</sup> Folgende Abbildung zeigt den Aufbau von Hochpässen 1. bis 3. Ordnung in Form eines Schaltplans:<sup>17</sup>

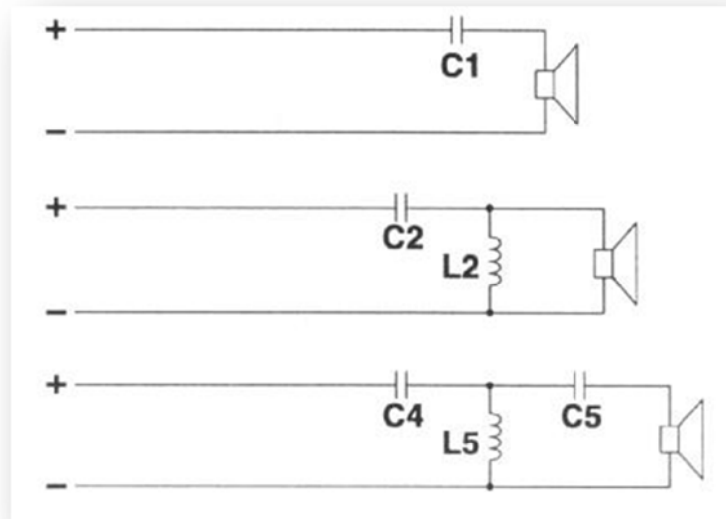


Abb. 5: Hochpass-Filter 1. - 3. Ordnung

### 6.1.1.3 Bandpass-Filter

Ein Bandpass-Filter wird für Lautsprecher eingesetzt, die in einem bestimmten Frequenzbereich arbeiten sollen. Im Gegensatz zu Hoch- und Tiefpässen, die keine obere bzw. untere Grenzfrequenz besitzen, ist der ungedämpfte Bereich beim Bandpass von einer oberen und einer unteren Grenzfrequenz bestimmt. Deshalb ist der Bandpass-Filter eine Anreihung eines Hochpass- und eines Tiefpass-Filters. Aus diesem Grund ist keine weitere Erklärung über den Aufbau von Bandpass-Filtern 1. bis 4. Ordnung nötig.<sup>18</sup>

Verdeutlicht wird dieser aber durch folgende Abbildung in Form eines Schaltbildes von Bandpass-Filtern 1. bis 3. Ordnung:<sup>19</sup>

<sup>16</sup> Vgl. (Hochpass Filter 2009)

<sup>17</sup> Quelle: (Hochpass Filter 2009)

<sup>18</sup> Vgl. (Elektrischer Bandpass 2009)

<sup>19</sup> Quelle: (Elektrischer Bandpass 2009)

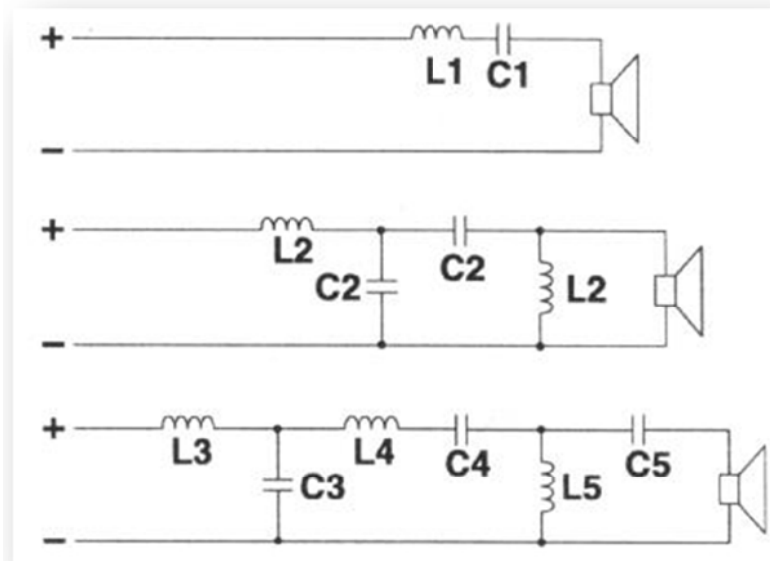


Abb. 6 Bandpass-Filter 1. - 3. Ordnung

#### 6.1.1.4 Subsonic-Filter

Der Subsonic-Filter ist ein spezieller Hochpassfilter, der subsonale Frequenzen (Infraschall), die für das menschliche Gehör nicht mehr wahrnehmbar sind, filtert. Der Aufbau ist dem aus 6.1.1.2 gleichzusetzen. Die Grenzfrequenz eines Subsonic-Filters liegt für gewöhnlich zwischen 20 und 40Hz. Diese Art von Filter wird verwendet, um Subwoofer vor tiefen, für Menschen unhörbaren Frequenzen zu schützen, welche die Schwingspule des Subwoofers unnötigerweise aufheizen würden und zu Beschädigungen dieser führen könnten. Damit diese subsonalen Frequenzen so gut wie möglich gefiltert werden können, muss ein Subsonic-Filter einen hohen Dämpfungsfaktor von mindestens 18dB/Oktave, besser noch 24dB/Oktave, aufweisen.<sup>20</sup>

#### 6.1.2 Bauteile

In diesem Kapitel soll auf den Aufbau und die Bauteile analoger, passiver Frequenzfilter eingegangen werden.

<sup>20</sup> Vgl. (Domingo Design - Highend Hifi für wahre Kenner 2004)



„Passive Weichen bestehen im allgemeinen (sic!) aus Vernetzungen von drei Bauteilarten:

-Kondensatoren

-Spulen

-ohmschen Widerständen“<sup>21</sup>

Die Funktion und die Aufgabe dieser einzelnen Bauteile soll an dieser Stelle näher betrachtet werden.

#### 6.1.2.1 Der Kondensator

Vereinfacht besteht ein Kondensator aus zwei Platten, die ein Dielektrikum wie z. B. Glas, Luft oder Keramik einschließen. Ein Kondensator stellt im Wechselstromkreis keinen ohmschen, sondern einen kapazitiven Widerstand dar. Die Eigenschaft dessen ist, dass der kapazitive Widerstand bei steigender Frequenz des Wechselstroms abnimmt. Bei Gleichstrom steigt der Widerstand eines Kondensators ins Unendliche. Dies lässt sich aus folgender Formel entnehmen, da der Wert des Produkts  $\omega C$  bei sinkender Frequenz gegen Null geht:<sup>22</sup>

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Folglich lässt ein Kondensator nur hohe Töne passieren, er dient somit als Hochpass (siehe 6.1.1.2). Deshalb werden Kondensatoren in Verbindung mit Hochtönern verwendet, um diese vor tiefen Frequenzen, die den Hochtöner auf Dauer beschädigen oder zerstören würden, zu schützen.<sup>23</sup>

Der frequenzabhängige Widerstand des Kondensators lässt sich im folgenden Diagramm veranschaulichen:<sup>24</sup>

<sup>21</sup> Vgl. S. 111 (Tenbusch 1989)

<sup>22</sup> Vgl. S. 112 (Stark 2004)

<sup>23</sup> Vgl. S. 113 (Tenbusch 1989)

<sup>24</sup> Quelle: S. 110 (Tenbusch 1989)

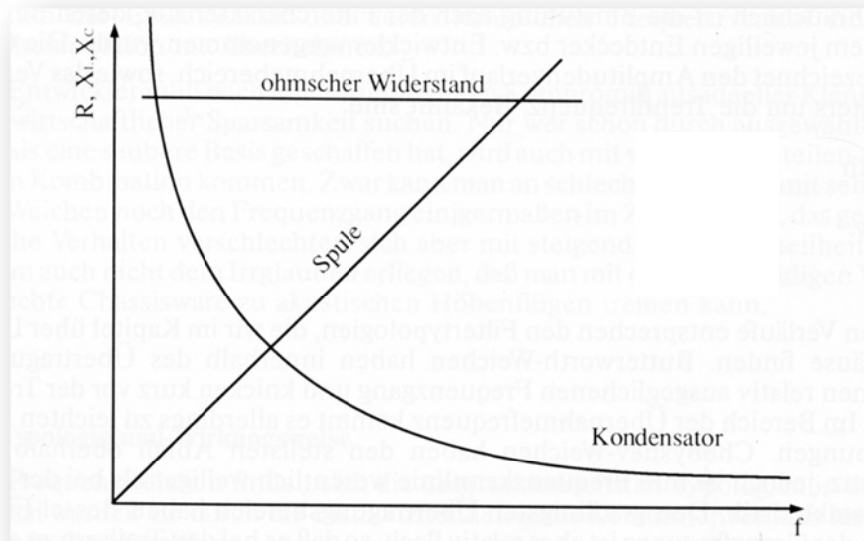


Abb. 7: Frequenzabhängigkeit des Widerstandes

Für Frequenzfilter eignen sich insbesondere Folienkondensatoren aus MKT- oder MKP-Folien. Elektrolytkondensatoren sind bedingt geeignet, solange sie von bipolarer Ausführung sind. Gepolte Elektrolytkondensatoren sind aufgrund des vorliegenden Wechselstroms nicht verwendbar.

#### 6.1.2.2 Die Spule

Spulen, die überwiegend in Frequenzfiltern verbaut werden, sind Luft- und Kernspulen. „Bei Luftspulen wird der Draht auf einen zylindrischen Wickelkörper gedreht, der in seiner Mitte frei von Einschlüssen ist“.<sup>25</sup> Um den Eigenwiderstand (ohmscher Widerstand) der Spule so klein wie möglich zu halten, muss der Drahtdurchmesser und somit die Spule relativ groß dimensioniert werden, da die Berechnungen von Frequenzweichen von idealen Spulen ausgehen. „Bei den Kernspulen wird (sic!) ein magnetisch wirksames Material in den Kern eingefügt, der die Induktivität um ein vielfaches (sic!) verstärkt“.<sup>26</sup> Demgemäß lassen sich kleinere Spulen realisieren, die aber nicht so verzerrungsfrei arbeiten wie Luftspulen.<sup>27</sup>

<sup>25</sup> S.115 (Tenbusch 1989)

<sup>26</sup> S.115 (Tenbusch 1989)

<sup>27</sup> Vgl. S.115 (Tenbusch 1989)

Die Spule ist das Gegenstück des Kondensators. Sie stellt keinen kapazitiven, sondern einen induktiven Widerstand im Wechselstromkreis dar. Bei steigender Frequenz des Wechselstromes steigt auch der induktive Widerstand an. Bei Gleichstrom wäre der induktive Widerstand einer idealen Spule gleich Null. Als Darstellung dient ebenfalls Abb. 1 (siehe 6.1.2.1). Als Beleg dafür dient folgende Formel, da bei Gleichstrom der Wert des Produkts  $\omega L$  Null entspricht:<sup>28</sup>

$$X_L = \omega L$$

Spulen werden deshalb in Verbindung mit den Tieftönern eingesetzt, damit diesen keine hohen Töne zugeführt werden, für welche die Membran aus mechanischen Gründen nicht schnell genug schwingen kann.

### 6.1.2.3 Der Widerstand

Der sogenannte ohmsche Widerstand ist das unproblematischste Bauteil einer Frequenzweiche, da er nicht frequenzabhängig ist. Ohmsche Widerstände werden deshalb zur Pegelanpassung verwendet. Da der Schalldruck der Hochtöner (bei einer Drei-Wege-Box auch Mitteltöner) im Vergleich zum Tieftöner erfahrungsgemäß größer ist, sind die einzelnen Chassis nicht gleich laut. Deshalb muss der Gesamtpegel der Hochtöner dem der Tieftöner angepasst werden. Dazu werden die Widerstände in Form von Spannungsteilern in den Hochton- bzw. Mitteltonzweig verbaut. Ein Spannungsteiler stellt einen in Reihe und einen parallel geschalteten Widerstand zum Lautsprecher dar,<sup>29</sup> was anhand folgender Abbildung verdeutlicht werden soll:<sup>30</sup>

<sup>28</sup> Vgl. S. 112 (Tenbusch 1989)

<sup>29</sup> Vgl. S. 173 f. (Stark 2004)

<sup>30</sup> Quelle: S.174 (Stark 2004)

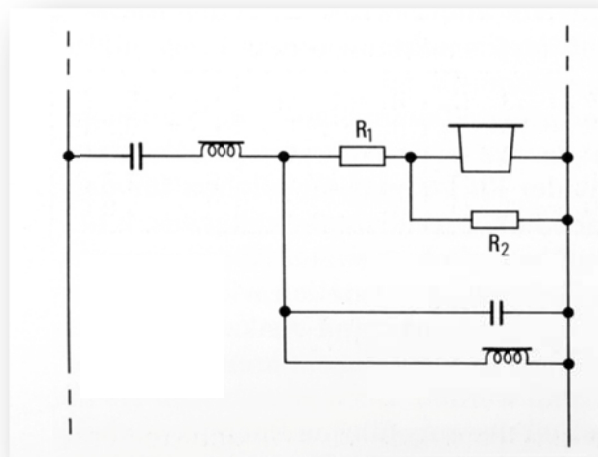


Abb. 8: Spannungsteiler im Mitteltonzweig mit den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$

### 6.1.3 Auswahl der Bauteile

Da Spulen und Kondensatoren sowie Widerstände nur in handelsüblichen Normgrößen hergestellt werden, müssen die ausgerechneten Werte der Spulen und Kondensatoren auf die nächsten benachbarten Normgrößen gerundet werden. Eine Abweichung von mehr als 10% sollte vermieden werden. Dabei sind die Eigentoleranzen der ausgewählten Bauteile selbst zu beachten, um die Toleranz von 10% nicht zu überschreiten.<sup>31</sup>

## 6.2 Praktischer Bau und Berechnung von analogen passiven Filtern

Als praktisches Projekt dieser Arbeit wurde ein Tiefpassfilter sowie eine 2-Wege Frequenzweiche gebaut. Um diese auf Funktion zu testen, war es zusätzlich nötig, einen Audio-Verstärker zu konstruieren. Aus technischen Sicherheitsgründen wurde ein Stereo-Verstärker auf 12V Basis ausgewählt, der pro Kanal 50 Watt RMS leisten kann. Dieser wurde nach folgendem Schaltplan gebaut.<sup>32</sup>

<sup>31</sup> Vgl. S. 171 (Stark 2004)

<sup>32</sup> Quelle: (Knolles Elektronik Basteln Page 2006)

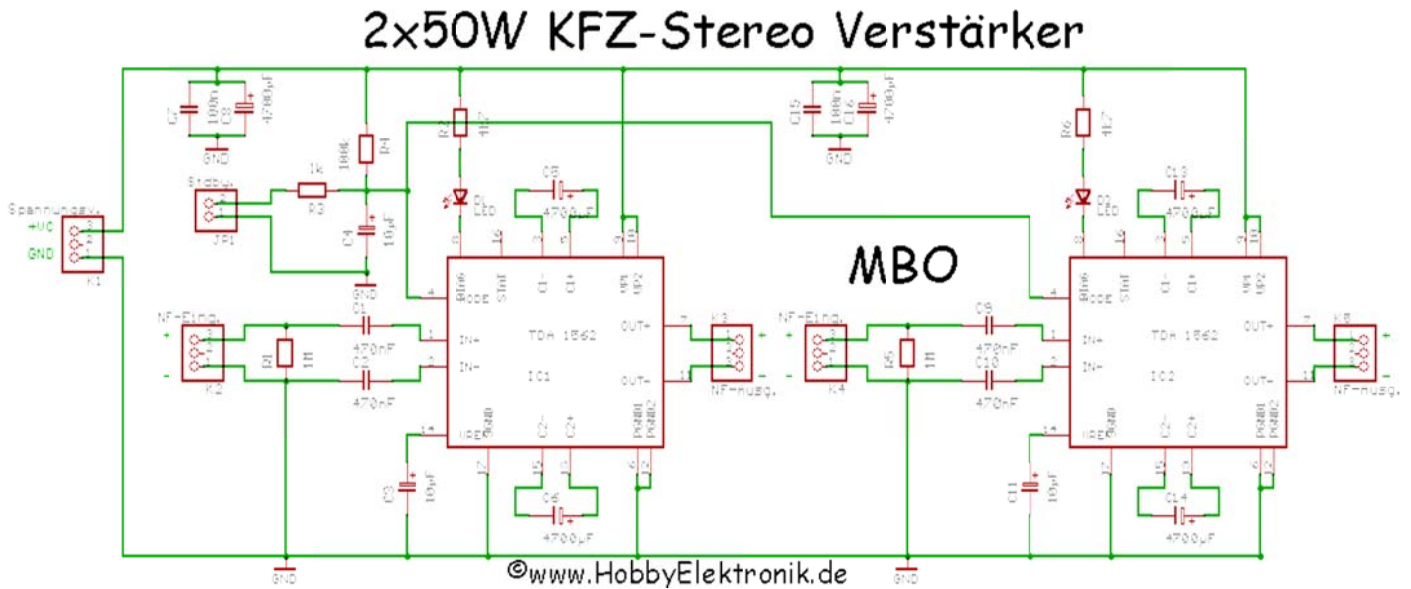


Abb. 9: Schaltplan des 12V Verstärkers

Zusätzlich wurde eine 2-Wege Lautsprecherbox mit der Impedanz von  $8\Omega$ , die aus eigenem Entwurf entstand, gebaut. Diese Lautsprecherbox weist keine interne Frequenzweiche auf und ist somit auf die Frequenzweiche aus 6.2.3 angewiesen. Mit Hilfe des Verstärkers und des Lautsprechers können die gebauten Frequenzfilter getestet sowie einige Frequenzmessungen durchgeführt werden. Folgende Abbildung zeigt den gebauten Verstärker sowie den angefertigten Lautsprecher:<sup>33</sup>



Abb. 10: 12V Verstärker und 2-Wege-Lautsprecher

<sup>33</sup> Quelle: Eigene Darstellung

Für den Bau und die Berechnung von Frequenzweichen gibt es mehrere Methoden, die sich in ihrer Charakteristik unterscheiden. Die bekanntesten Filter sind Butterworth-, Linkwitz-Riley-, Bessel- und Chebyshev-Filter. Ein Filter mit Bessel-Charakteristik zeichnet sich durch eine sehr geringe Welligkeit im Frequenzgang aus, ein Filter nach Chebyshev hingegen durch eine relativ große Welligkeit. Letzterer erweist sich jedoch in Bezug auf seinen schnellen Abfall im Frequenzgang als vorteilhafter. Ein Butterworth-Filter, der seit den 50er Jahren meistverwendete Filter, kann anhand seines sehr geraden Frequenzganges charakterisiert werden.<sup>34</sup> Die Filter, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, wurden ebenfalls nach der Butterworth-Methode berechnet und gebaut. Die folgende Abbildung zeigt den Frequenzgang dieser angesprochenen drei Filter im Vergleich:<sup>35</sup>

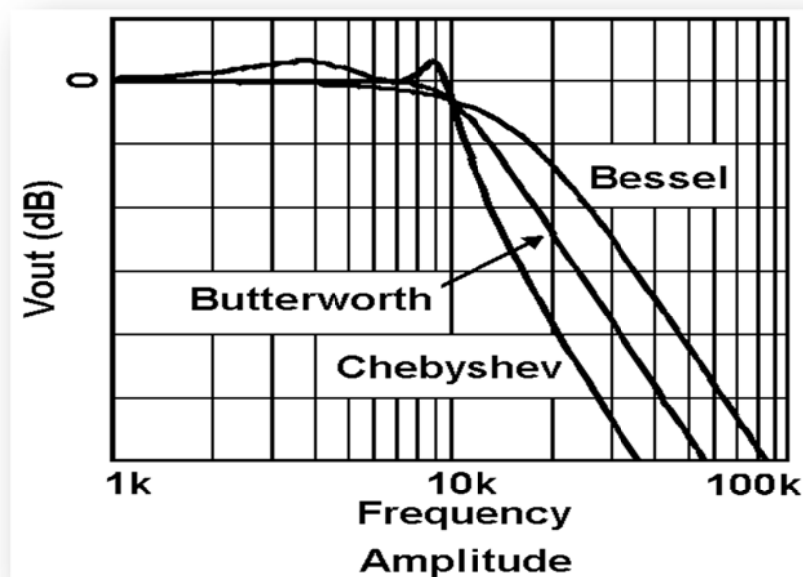


Abb. 11: Vergleich der Frequenzgänge verschiedener Filter

Frequenzweichen können als Serien- oder als Parallelschaltung konstruiert werden. Durchgesetzt hat sich aber die Parallelschaltung, da diese eine höhere Flexibilität aufweist. Jedes Chassis kann individuell abgestimmt werden, was bei der Serienschaltung nicht möglich ist. Dort kann sich jede Bauteilveränderung auch auf die an-

<sup>34</sup> Vgl. S. 179 (Dickason 2005), (Butterworth-Filter ITwissen.info 2007), (Bessel-Filter ITwissen.info 2007)

<sup>35</sup> Quelle: (Butterworth Filters 2001)

deren Chassis des Filters auswirken.<sup>36</sup> Folgende Abbildung zeigt eine Parallelschaltung sowie eine Serienschaltung im Vergleich:<sup>37</sup>

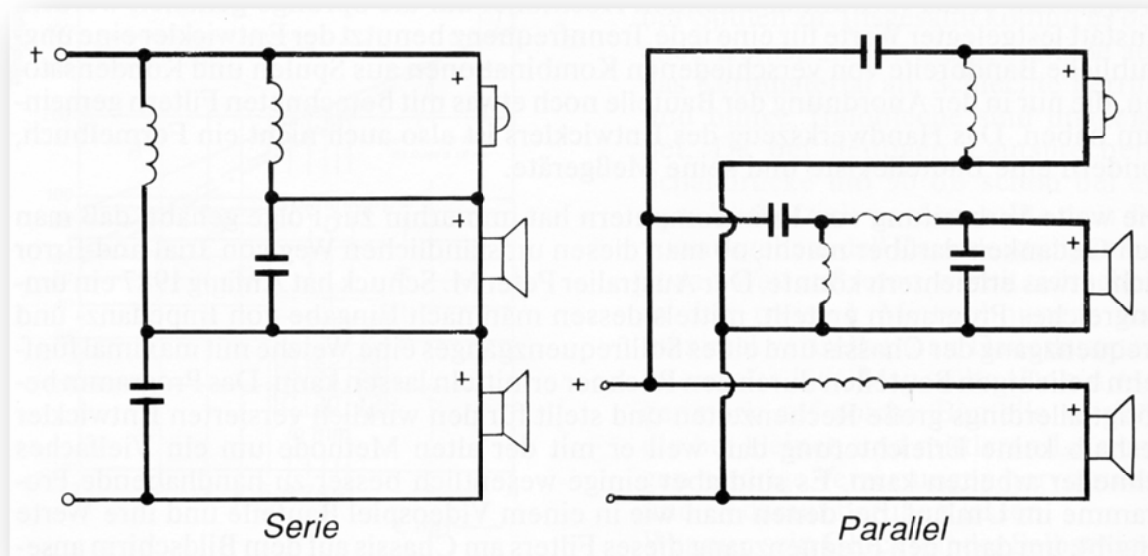


Abb. 12: Serielle und parallele Frequenzweiche im Vergleich

### 6.2.1 Berechnung von Frequenzfiltern

In diesem Abschnitt sollen die Berechnungsformeln für Frequenzfilter von der 1. - 4. Ordnung der Arten Butterworth, Linkwitz-Riley, Bessel und Chebychev dargestellt werden. Dabei ist  $f_c$  die angestrebte Trennfrequenz und  $Z$  die Impedanz des Chassis in Ohm.<sup>38</sup>

#### Filter 1. Ordnung

Butterworth:	$C(1) = \frac{0,195}{Z \cdot f_c}$	$L(1) = \frac{Z}{6,28 \cdot f_c}$
--------------	------------------------------------	-----------------------------------

<sup>36</sup> Vgl. S. 180 f. (Dickason 2005)

<sup>37</sup> Quelle: S. 118 (Tenbusch 1989)

<sup>38</sup> Vgl. S. 119 ff. (Tenbusch 1989)

**Filter 2. Ordnung**

Butterworth:	$C(1)(2) = \frac{0,1125}{Z \cdot f_c}$	$L(1)(2) = \frac{0,2251 \cdot Z}{f_c}$
--------------	----------------------------------------	----------------------------------------

Linkwitz-Riley:	$C(1)(2) = \frac{0,0796}{Z \cdot f_c}$	$L(1)(2) = \frac{0,3183 \cdot Z}{f_c}$
-----------------	----------------------------------------	----------------------------------------

Bessel:	$C(1)(2) = \frac{0,0912}{Z \cdot f_c}$	$L(1)(2) = \frac{0,2756 \cdot Z}{f_c}$
---------	----------------------------------------	----------------------------------------

Chebyshev:	$C(1)(2) = \frac{0,1592}{Z \cdot f_c}$	$L(1)(2) = \frac{0,1592 \cdot Z}{f_c}$
------------	----------------------------------------	----------------------------------------

**Filter 3. Ordnung**

Butterworth:	$C(1) = \frac{0,1061}{Z \cdot f_c}$	$L(1) = \frac{0,1194 \cdot Z}{f_c}$
	$C(2) = \frac{0,3183}{Z \cdot f_c}$	$L(2) = \frac{0,2387 \cdot Z}{f_c}$
	$C(3) = \frac{0,2122}{Z \cdot f_c}$	$L(3) = \frac{0,0796 \cdot Z}{f_c}$



### Filter 4. Ordnung

Butterworth:	$C(1) = \frac{0,0935}{Z \cdot f_c}$	$L(1) = \frac{0,1009 \cdot Z}{f_c}$
	$C(2) = \frac{0,1573}{Z \cdot f_c}$	$L(2) = \frac{0,4319 \cdot Z}{f_c}$
	$C(3) = \frac{0,2509}{Z \cdot f_c}$	$L(3) = \frac{0,2709 \cdot Z}{f_c}$
	$C(4) = \frac{0,0586}{Z \cdot f_c}$	$L(4) = \frac{0,1610 \cdot Z}{f_c}$

Linkwitz-Riley:	$C(1) = \frac{0,0844}{Z \cdot f_c}$	$L(1) = \frac{0,1000 \cdot Z}{f_c}$
	$C(2) = \frac{0,1688}{Z \cdot f_c}$	$L(2) = \frac{0,0451 \cdot Z}{f_c}$
	$C(3) = \frac{0,2533}{Z \cdot f_c}$	$L(3) = \frac{0,3000 \cdot Z}{f_c}$
	$C(4) = \frac{0,0563}{Z \cdot f_c}$	$L(4) = \frac{0,1500 \cdot Z}{f_c}$

Bessel:	$C(1) = \frac{0,0919}{Z \cdot f_c}$	$L(1) = \frac{0,1009 \cdot Z}{f_c}$
	$C(2) = \frac{0,1592}{Z \cdot f_c}$	$L(2) = \frac{0,4348 \cdot Z}{f_c}$
	$C(3) = \frac{0,2510}{Z \cdot f_c}$	$L(3) = \frac{0,2757 \cdot Z}{f_c}$
	$C(4) = \frac{0,0583}{Z \cdot f_c}$	$L(4) = \frac{0,1592 \cdot Z}{f_c}$

#### 6.2.2 Bau eines Tiefpass-Filters

Gebaut wurde ein Tiefpassfilter 1. Ordnung nach Butterworth-Berechnung, der nur aus einer Spule besteht. Nach der Butterworth-Formel für Spulen eines Frequenzfilters 1. Ordnung gilt:<sup>39</sup>

<sup>39</sup> Vgl. S. 156 (Stark 2004)

$$L = \frac{10^3 \cdot Z}{2\pi \cdot f_c}$$

Bei einer angestrebten Trennfrequenz von 450Hz wurde deshalb eine Spule mit der Induktivität 2,7mH verbaut, da dies der nächsten Normgröße von Spulen entspricht. Diese Induktivität würde einer theoretischen Trennfrequenz von ca. 470Hz entsprechen. Dieser Schaltplan entspricht dem Aufbau des Tiefpassfilters:<sup>40</sup>

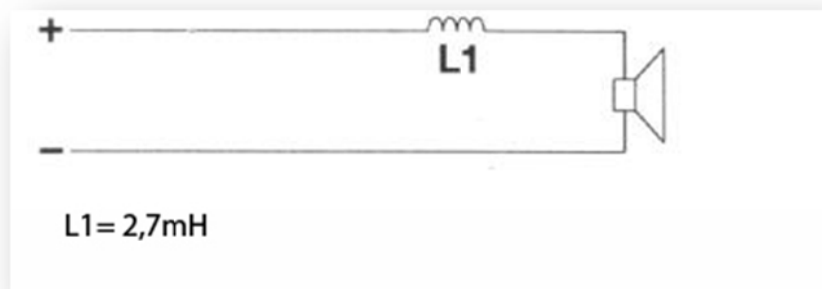


Abb. 13: Tiefpassfilter 1. Ordnung

### 6.2.3 Bau einer 2-Wege Frequenzweiche

Weiterhin wurde eine 2-Wege Frequenzweiche 2. Ordnung gebaut, die mit einer Trennfrequenz von 3000 Hz auf die konstruierte Lautsprecherbox abgestimmt ist. Sie besteht aus zwei Spulen sowie zwei Kondensatoren, die mit folgenden Butterworth-Formeln für Frequenzfilter 2. Ordnung berechnet wurden:<sup>41</sup>

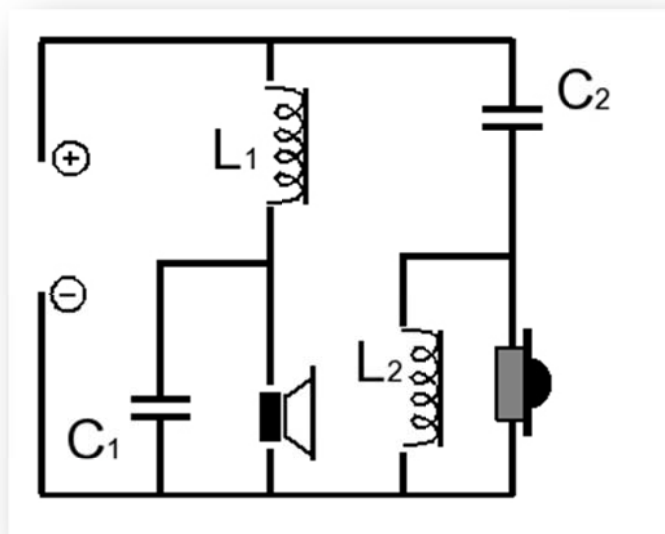
$$L = \frac{10^3 \cdot Z}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_c} \text{ und } C = \frac{10^6}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f_c}$$

Aus diesen Formeln resultiert der Wert 4,69µF für die Kondensatoren  $C_1$ ,  $C_2$  sowie der Wert 0,6mH für  $L_1$  und  $L_2$ . Aus praktischer Erfahrung wurden diese Werte teilweise abgeändert. So wurde die Induktivität der Spule  $L_1$  auf 1,2mH verdoppelt, um die im Mitteltonbereich erhöhte Leistungsabgabe von Tieftönern auszugleichen.

<sup>40</sup> In Anlehnung an: (Tiefpass Filter 2009)

<sup>41</sup> Vgl. S. 158 (Stark 2004)

Die Kapazität des Kondensators  $C_1$  wurde um 50% auf  $6,8\mu\text{F}$  vergrößert, um Abrissresonanzen des Tieftöners, die in der Nähe ihrer maximalen Einsatzfrequenz auftreten können, zu unterbinden. Da die Trennfrequenz mit  $3000\text{Hz}$  in der Nähe der maximalen Einsatzfrequenz liegt, war diese Veränderung unentbehrlich. Zudem wurde die Kapazität des Kondensators  $C_2$  um ein Drittel auf  $3,3\mu\text{F}$  verringert.<sup>42</sup> Den Aufbau der Frequenzweiche zeigt folgendes Schaltbild:<sup>43</sup>



$$L_1 = 1,2\text{mH}$$

$$C_1 = 6,8\mu\text{F}$$

$$L_2 = 0,56\text{mH}$$

$$C_2 = 3,3\mu\text{F}$$

Abb. 14: Schaltplan der konstruierten 2-Wege Frequenzweiche 2. Ordnung

### 6.3 Messungen der Frequenzgänge

Um die korrekte Funktion der konstruierten Frequenzfilter zu testen, wurden innerhalb des praktischen Teils dieser Arbeit einige Frequenzgangmessungen durchgeführt. Dazu wurde das Freeware Programm „Audionet CARMA V3.0“<sup>44</sup> verwendet.

Um die korrekte und genaue Messung sicherzustellen, wurden jeweils ein  $500\text{Hz}$  sowie ein  $1\text{kHz}$  Ton abgespielt und mittels Mikrofon gemessen. Das Ergebnis zeigte, dass die Töne gut und sehr genau wiedergegeben wurden.

<sup>42</sup> Vgl. S. 158 f. (Stark 2004)

<sup>43</sup> In Anlehnung an (Frequenzweiche - Wikipedia 2009)

<sup>44</sup> Quelle: (Audionet)

Folgende Abbildung zeigt die Frequenzmessung des 1kHz Tones:<sup>45</sup>

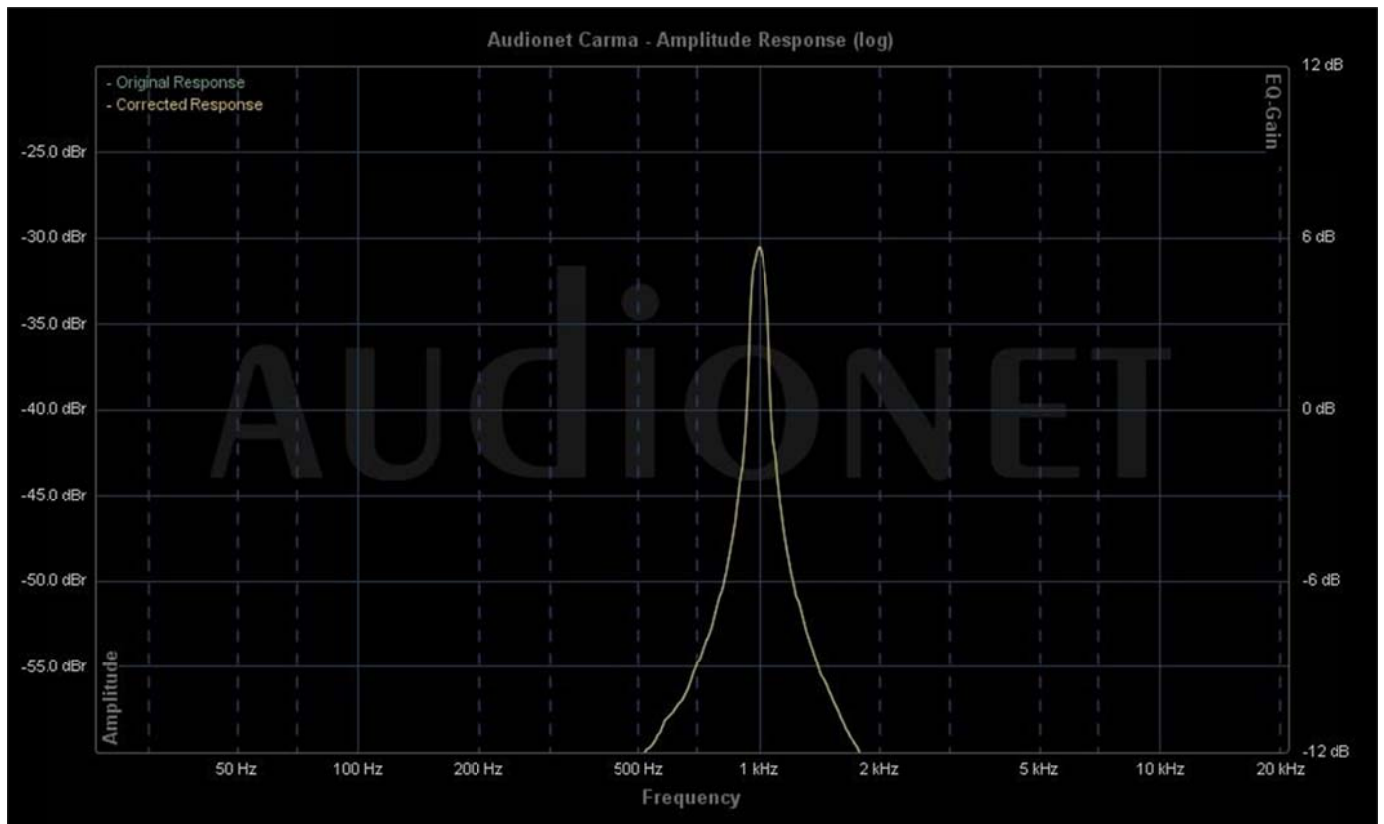


Abb. 15: Frequenzmessung eines 1kHz Tones

An der 2-Wege Frequenzweiche 2. Ordnung wurden mehrere Messungen durchgeführt. Abgespielt wurde ein „weißes Rauschen“. Das ist ein Geräusch, welches das komplette Tonfrequenzband enthält.

<sup>45</sup> Quelle: Eigene Darstellung

Folgende Messung weist einen relativ geraden Frequenzgang über das gesamte Frequenzband auf. Dieser Frequenzgang ist ein Anzeichen für die korrekte Funktion der Frequenzweiche sowie für eine korrekte Berechnung der Trennfrequenz.<sup>46</sup>

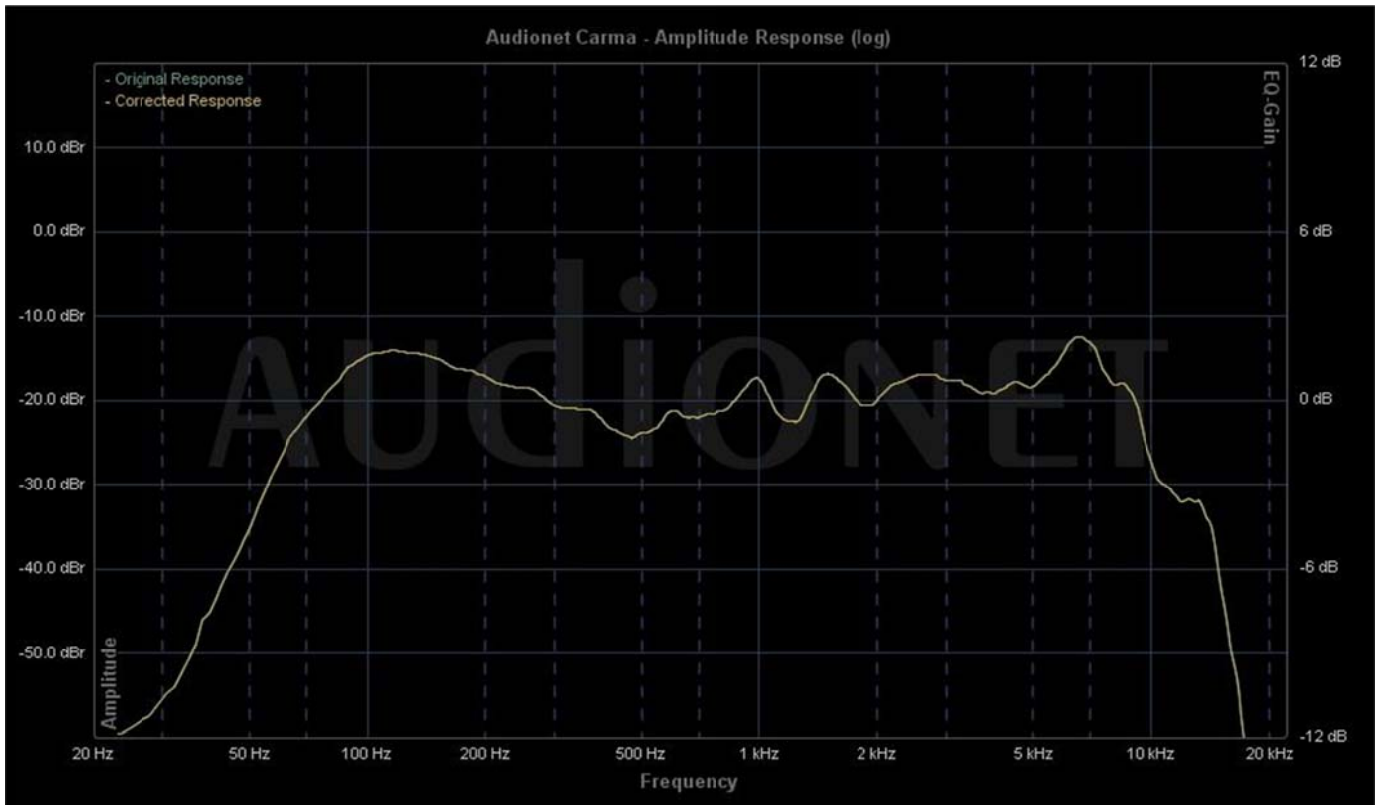


Abb. 16: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ an der 2-Wege Frequenzweiche

Die zweite Messung an der 2-Wege Weiche entsprach der ersten Version, mit dem einzigen Unterschied, dass der Hochtöner keine Verwendung fand. Somit agierte bei der Messung nur der Tieftöner. Diese Frequenzmessung zeigt demnach die Trennfrequenz des Tieftöners, die bei 3kHz liegen sollte. Die Abbildung zeigt, dass die Frequenzkurve nach der angestrebten Grenzfrequenz von 3kHz steil sinkt. Erkennbar ist außerdem eine Abrissresonanz des Tieftöners bei ca. 5kHz, ebenfalls ersicht-lich in Abb. 15, welche die Frequenzweiche nicht verhindern kann.<sup>47</sup>

<sup>46</sup> Quelle: Eigene Darstellung

<sup>47</sup> Quelle: Eigene Darstellung

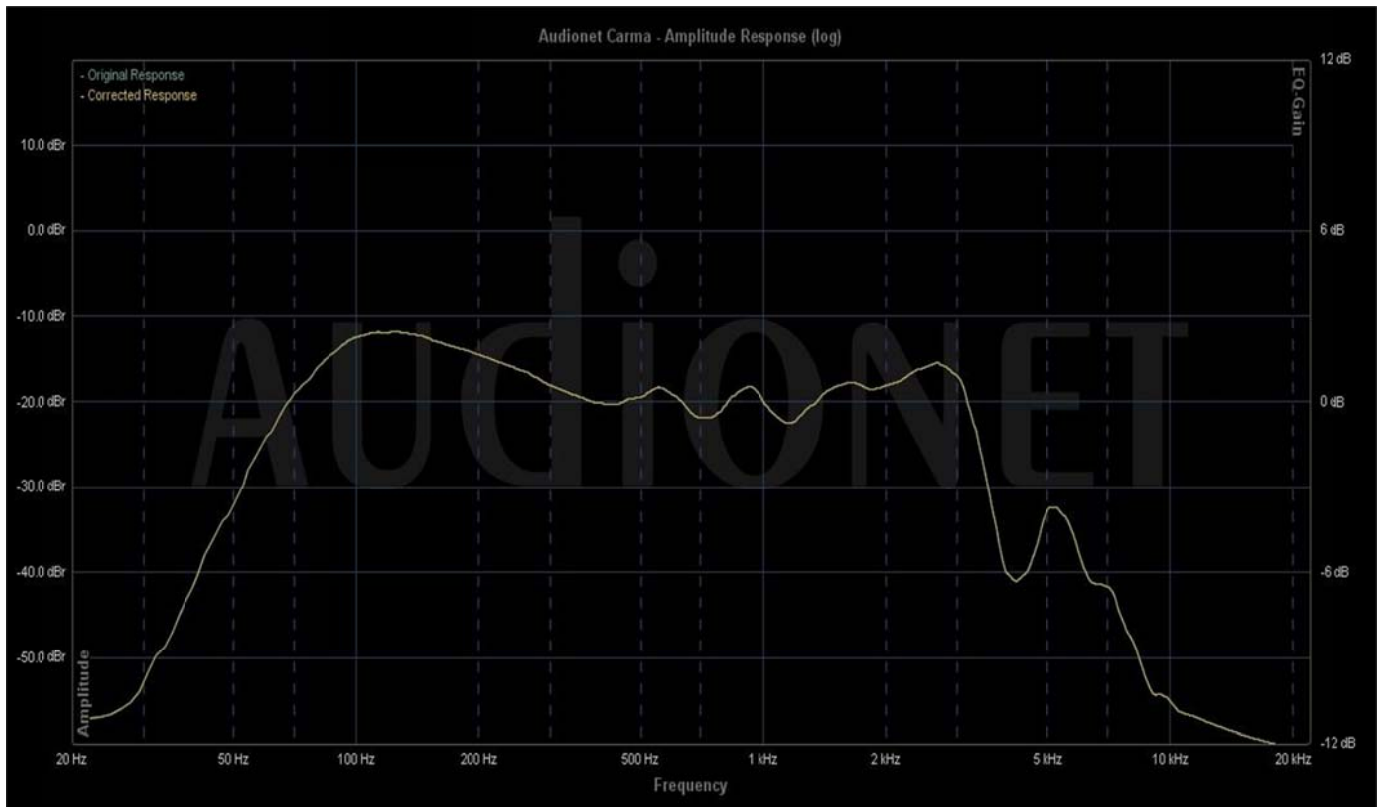


Abb. 17: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ an der 2-Wege Frequenzweiche ohne Einsatz des Hochtöners

Am Tiefpassfilter 1. Ordnung wurden ebenfalls Frequenzgangmessungen mit „weißem Rauschen“ durchgeführt. Bei den Messungen agierte gleichermaßen nur der Tieftöner. Im Gegensatz zur Frequenzgangmessung, die ohne Tiefpassfilter entstand, weist diese Messung eine deutliche Abschwächung des Signals nach der Grenzfrequenz von ca. 450Hz auf. Die blaue Linie der Abbildung entspricht der Messung mit dem Tiefpassfilter, die gelbe Linie der Messung ohne Filter. Die Abrissresonanz des Tieftöners ist bei dieser Abbildung ebenfalls ersichtlich:<sup>48</sup>

<sup>48</sup> Quelle: Eigene Darstellung

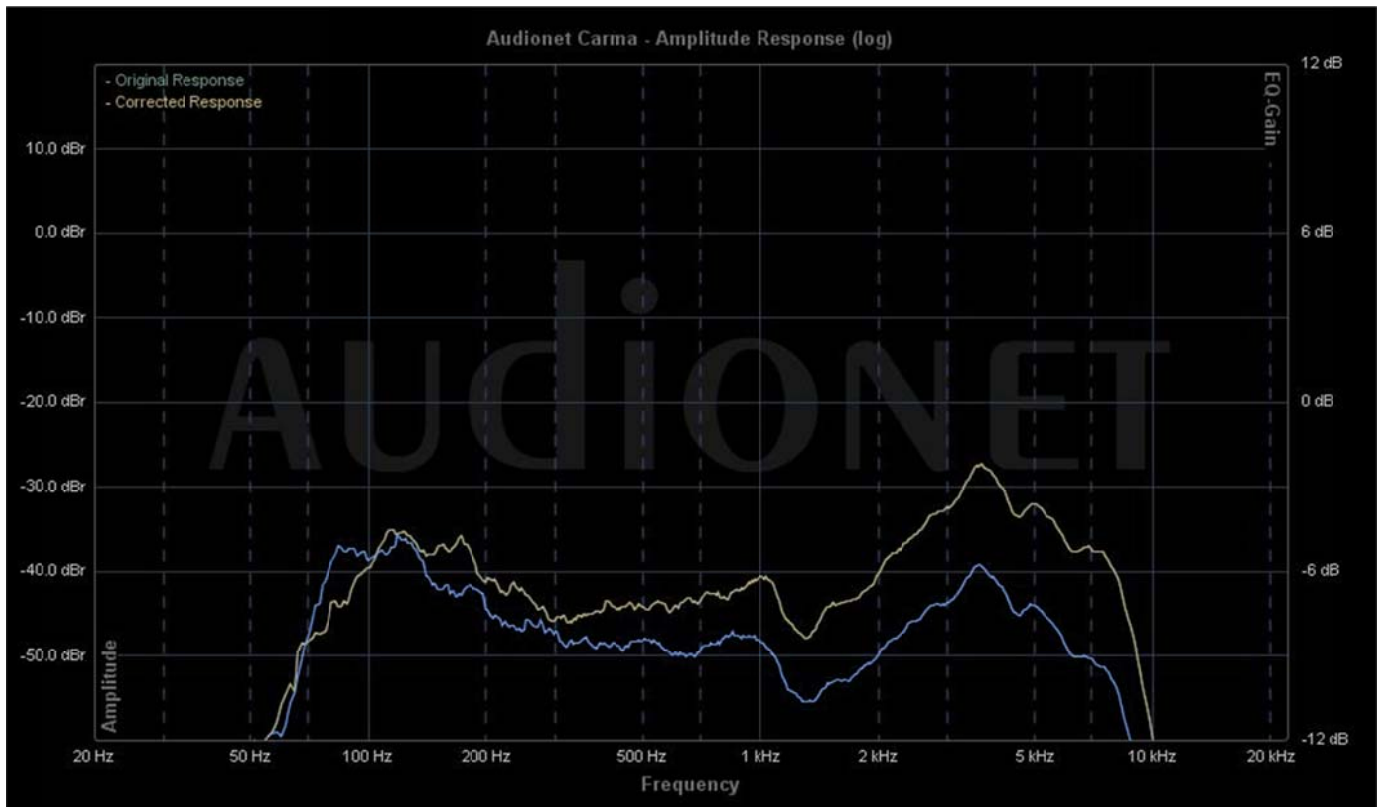


Abb. 18: Frequenzmessung von „weißem Rauschen“ mit (blaue Linie) und ohne (gelbe Linie) Tiefpassfilter

Anhand dieser durchgeführten Messungen, konnten die Frequenzfilter auf ihre Funktionstüchtigkeit hin untersucht werden. Sie bestätigen den korrekten Aufbau und das richtige Vorgehen bei der praktischen Umsetzung dieser Arbeit.

## 7 Ausblick

Durch die Entwicklung von analogen Frequenzfiltern ist es möglich geworden, sehr gute Lautsprecher zu konstruieren. Frequenzfilter sind folglich aus den heutigen Lautsprechern nicht mehr wegzudenken. Ohne diese wäre ein Kino- oder Diskothekenbesuch nicht annähernd so aufregend.

Durch die Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wird die essentielle Bedeutung der Frequenzfilter bestätigt. Ohne diese wäre eine harmonische Wiedergabe von Musik nicht möglich, denn die einzelnen Chassis könnten nicht separat angesteuert werden.

Beispielsweise wäre es ohne Frequenzweiche nicht möglich gewesen, einen geraden Frequenzverlauf von mehreren Chassis zu erreichen, welcher bei den Messungen in dieser Arbeit dank der 2-Wege-Weiche erreicht wurde.

Problematisch erwies sich die Tatsache, dass die Berechnungen für Frequenzfilter, die in dieser Facharbeit theoretisch dargestellt wurden, von idealen Bauteilen ausgehen. In der Realität gibt es dagegen keine idealen Bauteile. Beispielsweise ist die Impedanz eines Lautsprecherchassis nicht konstant, sondern variiert je nach Frequenz. Somit ist es mithilfe dieser Formeln nicht möglich, einen perfekten Frequenzfilter zu konstruieren. Um einen guten Frequenzfilter zu bauen, sind intensive Hörtests sowie Frequenzgangmessungen von Nöten.

Mit der zunehmenden Digitalisierung in der heutigen Zeit wird die analoge Frequenzweiche in Zukunft jedoch mehr und mehr von der digitalen verdrängt werden. Sobald es möglich ist, digitale Filter günstiger zu produzieren als analoge Filter, wird die Ära der analogen Filter beendet sein.



## 8 Literaturverzeichnis

Audionet. AUDIONET - Man höre und staune.

<http://www.audionet.de/main/service/downloads/carma-v30/page.html> (Zugriff am 26. Januar 2010).

Bessel-Filter ITwissen.info. 28. August 2007.

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Bessel-Filter-Bessel-filter.html> (Zugriff am 22. Januar 2010).

Butterworth Filters. 9. Mai 2001. [http://www-](http://www-k.ext.ti.com/SRVs/Data/ti/KnowledgeBases/analog/document/faqs/bu.htm)

[k.ext.ti.com/SRVs/Data/ti/KnowledgeBases/analog/document/faqs/bu.htm](http://www-k.ext.ti.com/SRVs/Data/ti/KnowledgeBases/analog/document/faqs/bu.htm) (Zugriff am 22. Januar 2010).

Butterworth-Filter ITwissen.info. 28. August 2007.

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Butterworth-Filter-Butterworth-filter.html> (Zugriff am 22. Januar 2010).

**Dickason, Vance:** Lautsprecherbau - Bewährte Rezepte für den perfekten Bau 3. Auflage. Aachen: Elektor, 2005.

„Domingo Design - Highend Hifi für wahre Kenner.“ Artikel Subsonicfilter. 24. August 2004. <http://www.domino-design.de/downloads/ALTO/Pressespiegel/Sub%2016%20/cuh%20-%20Artikel%20Subsonicfilter%20-%20Sub%2016.pdf> (Zugriff am 6. November 2009).

Elektrischer Bandpass. 11. Juni 2009. [http://bandpass.de/Bandpass\\_Filter.html](http://bandpass.de/Bandpass_Filter.html) (Zugriff am 6. November 2009).

Frequenzweiche - Wikipedia. 28. August 2009.

<http://de.wikipedia.org/wiki/Frequenzweiche> (Zugriff am 1. November 2009).

Frequenzweiche ITWissen.info. 22. Juli 2009.

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Frequenzweiche-diplexer.html> (Zugriff am 22. 01 2010).

Hochpass Filter. 11. Juni 2009. [http://bandpass.de/Hochpass\\_Filter.html](http://bandpass.de/Hochpass_Filter.html) (Zugriff am 6. November 2009).

Knolles Elektronik Basteln Page. 21. Mai 2006.

<http://knollep.de/Hobbyelektronik/projekte/36/sch.htm> (Zugriff am 31. 12 2009).

**Schwamkrug, G.:** Lautsprecherboxen Aufbau - Nachbau - Umbau 3. Auflage. Aachen: Elektor, 1991.

**Stark, Berndt:** Lautsprecher Handbuch; Theorie und Praxis des Boxenbauens  
8.Auflage. o.O: Pflaum, 2004.

**Tenbusch, W.J.:** Grundlagen der Lautsprecher. Oberhausen: Michael E. Brieden  
Verlag, 1989.

Tiefpass Filter. 11. Juni 2009. [http://www.bandpass.de/Tiefpass\\_Filter.html](http://www.bandpass.de/Tiefpass_Filter.html) (Zugriff  
am 6. November 2009).

**Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.**

\_\_\_\_\_, den \_\_\_\_\_

**Ort**

**Datum**

\_\_\_\_\_  
**Unterschrift des Kollegiaten**